

폐 영구자석으로부터 회수한 염화희토류용액에서 PC88A를 이용한 경희토류(Pr, Nd)/중희토류(Tb, Dy) 용매추출

전수병*** · §손인준* · 임병철** · 김정모** · 김연진** · 하태규** · 윤호성*** · 김철주*** · 정경우***

*경북대학교 신소재공학부, **성림희토류금속(주), ***한국지질자원연구원

Solvent Extraction of Light (Pr, Nd) and Medium (Tb, Dy) Rare Earth Elements with PC88A of Rare Earth Chloride Solution from Waste Permanent Magnet

Su-Byung Jeon***, §InJoon Son*, Byung-Chul Lim**, Jeong-Mo Kim**, Yeon-Jin Kim**,
Tae-Gyu Ha**, Ho-Sung Yoon***, Chul-Joo Kim*** and Kyeong-Woo Chung***

*School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

**SungLim Rare Earth Metal Co. Ltd., 49, Dalseo-daero 85-gil, Dalseo-gu, Daegu 42714, Korea

***Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

요 약

Nd-Fe-B 폐 영구자석으로부터 회수한 염화희토류용액을 PC88A에 의한 경희토류(Pr, Nd)/중희토류(Tb, Dy) 분리정제에 대한 용매추출 연구를 진행하였다. 회분식 실험 단계에서 추출제(PC88A) 농도 0.5 M, 추출 후 평형 pH는 0.8~1.0(feed의 초기 pH 1.3), 세정액(HCl)의 농도는 0.1 M, 탈거액(HCl)의 농도는 2 M 이상일 때 분리 효율이 좋은 것을 확인하였다. 이 결과값을 혼합침강조에 적용하여 초기 조건에서 운용 조건을 변화시키면서 180시간 운용하여 3N급의 경희토류(Pr, Nd)/중희토류(Tb, Dy)금속 이온으로 분리정제 후 회수하였다.

주제어 : 폐 영구자석, PC88A, 용매추출, 혼합침강조, 경희토류

Abstract

Solvent extraction behavior of light rare earth elements (Pr, Nd) and medium rare earth elements (Tb, Dy) in the HCl-PC88A-kerosene extraction system was investigated in order to separate high-purity light rare earths (Pr, Nd) and medium rare earths (Tb, Dy) in the mixed rare earth chloride solution. In the batch test step, it was confirmed that the separation efficiency was good when the extractant concentration (PC88A) was 0.5 M, the equilibrium pH after extraction was 0.8 to 1.0 (initial pH 1.3 of the feed), the concentrations of hydrochloric acid in scrubbing solution was set as 0.1 M, the concentrations of hydrochloric acid in stripping solution was set as 2.0 M or more. Based on the experimental data obtained from the batch test, the mixer-settler was composed as follows; 4 stages of extraction, 8 stages of scrubbing, 4 stages of stripping, and 3 stages of pickling organic solution. The Mixer-settler was operated for 180 hours, and the operating conditions were continuously adjusted to obtain the high-purity light/medium rare earths. Finally, the purity of light (Pr, Nd) and medium rare earth elements (Tb, Dy) was reached as 3 N class.

Key words : Waste permanent magnet, PC88A, Solvent extraction, Mixer-settler, Light rare earth elements

· Received : February 7, 2018 · Revised : March 23, 2018 · Accepted : April 25, 2018

§ Corresponding Author : InJoon Son (E-mail: ijson@knu.ac.kr)

School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea

© The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

희토류금속은 다른 금속들과 달리 원자번호가 증가할수록 4f 궤도의 전자가 채워지는 특성을 가지고 있고, 이로 인해 원자번호가 증가할수록 원자의 크기가 줄어드는 란타늄 수축이라는 특성을 가지고 있다. 희토류금속은 형광체 및 고성능 자석 소재로서 활용도가 높고, 수소저장 합금을 이용한 에너지 저장용 충전지, 촉매, 초전도체, 의학, 농업 등 다분야의 응용에 대한 연구가 진행 중이다. 희토류금속 중 Nd는 Nd-Fe-B계 영구자석으로 널리 쓰이고 있으며, 이 영구자석은 높은 최대 에너지적(BHmax) 특성에 따라 이동통신, 정보통신, 가전 등 응용기기의 소형화, 경량화, 고성능화가 가능하기 때문에 수요가 급증하고 있으며, 따라서 희토류 정광으로부터 희토류원소를 고순도로 추출하기 위해 연구가 진행 중이다¹⁻⁷⁾.

최근에는 고순도 희토류금속을 분리, 정제하기 위한 방법으로 용매추출법과 이온교환 크로마토그래피법이 각광받고 있다. 특히 용매추출법의 경우 처리용량이 크고, 반응속도가 빠르며 분리효과가 좋다. 양이온 추출제의 일종인 D2EHPA(Di(2-ethylhexyl) phosphoric acid, HEEHP)와 PC88A(2-ethyl hexyl phosphonic acid mono-2-ethyl hexyl ester, HEH (EHP))는 금속의 용매추출에 흔히 사용되는 추출제이며, 희토류금속의 분리에도 많이 사용되고 있다. PC88A에 의한 희토류금속의 추출율이 D2EHPA보다 낮지만, PC88A를 추출제로 사용하는 경우 분리인자가 더 크다. 또한 PC88A는 경희토류금속과 중희토류금속을 분리하는데 효과적이다. 따라서 PC88A를 이용한 희토류금속 분리에 대해 많은 연구가 행해지고 있다⁸⁻¹³⁾.

PC88A와 같은 양이온 추출제로 혼합침강조를 이용한 연속공정으로 희토류금속을 분리하는 경우, 유기상으로 추출된 희토류원소와 이온교환 되는 수소이온으로 인해 수상의 pH가 낮아지면서 추출의 구동력이 감소한다. 따라서 희토류원소와 같이 분리가 어려운 경우에는 혼합침강조 추출단수가 증가하게 된다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 양이온추출제를 비누화시킨 다음 추출제로 사용하는 방법도 연구되어 왔다^{14,15)}.

하지만, 국내에서 이루어진 경/중희토류의 용매추출 분리 실험은 희토류 함량이 적은 정광이나 적은 양의 시약을 시료로 사용하여 왔다. 본 연구에서 사용한 혼합희토류용액은 기존에 이루어진 연구보다 희토류의 함량이 많을 뿐 아니라 중희토류의 함량비 또한 많은 용

액을 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 추출제로 PC88A를 사용하여 폐 영구자석으로부터 회수한 염화혼합희토류용액에서 경희토류(Pr, Nd)/중희토류(Tb, Dy) 용매추출 분리/정제에 대해 연구하였다.

2. 시료 및 실험방법

2.1. 시료

시료로 사용된 염화희토류용액은 Nd-Fe-B계 폐 영구자석으로부터 파/분쇄-산화배소-황산침출-복염침전-수산화물전환-염산용해 공정으로 얻어졌으며, 불순물이 제거된 고순도의 염화혼합희토류 수용액을 실험에 사용하였다.

Table 1에 본 연구에서 사용한 염화혼합희토류용액(feed)의 농도를 나타내었다. 추출제로 사용한 PC88A와 희석제 kerosene은 모두 시약급으로 정제하지 않고 그대로 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 용매추출 회분식 실험

용매추출 회분식 실험은 일정 시간 내에 일정한 혼합을 위하여 funnel shaker(창신과학, C-SKR)를 이용하여 실험을 진행하였다. 회분식 실험에 사용된 수상액(feed)은 염화혼합희토류수용액을 이용하였고, 유기상은 추출제인 PC88A를 kerosene에 희석하여 사용하였다. 500 ml 분액여두에 pH가 조절된 일정량의 수상액과 일정량의 유기상액(희석한 추출제 PC88A)를 넣고 상온에서 funnel shaker를 이용하여 30분 간 교반한 뒤 2시간 정지하여 수상과 유기상을 분리하였다. 수상의 초기 pH 변화에 의한 추출률을 확인하기 위하여 수상액(feed)을 HCl과 NH₄OH를 이용하여 초기 pH를 조절하였다. 이때 pH는 pH meter (DKK-TOA, HM-25R)로 측정하였다. 추출 전 후 수상에 존재하는 희토류 금속의 농도는 ICP-OES (PerkinElmer, Optima 3000 XL)로 분석하였고, 유기상으로 추출된 희토류 금속의 농도는 물질수지를 이용하여 구하였다.

Table 1. Concentration of rare earth chloride solution (feed)

	Pr	Nd	Tb	Dy
conc. (mg/L)	16,190	23,710	1,090	3,366

2.2.2. 혼합침강조(mixer-settler)를 활용한 연속용매 추출

연속식 용매추출 pilot plant 설비인 혼합 침강조(mixer-settler)를 설계/제작하여 실험을 진행하였다. 혼합침강조는 혼합조 용적 1 L (width 100 mm, depth 100 mm, height 100 mm), 침강조 용적 3.75 L (width 4,800 mm, depth 100 mm, height 90 mm (유기상 출구 제외 면적))로 침강조/혼합조 용적비는 3.75이며, 각 단이 분리형으로 제작되어 공정 최적화를 통하여 단수 변경이 가능하도록 설계되었고, 재질은 투명 PVC를 사용하여 공정 중 내부 모습이 확인 가능하도록 설계/제작하였다. 용액 공급 장치는 장기간 정량공급이 가능한 다이어프램(diaphragm) 정량펌프를 사용하였다. Table 2는 혼합침강조 초기 운용 조건을 나타내었고, 이 조건을 혼합침강조에 적용하여 운용시간대별로 회토류 금속의 농도를 분석하였다. 분석을 위한 샘플 채취는 수상 출구 부분에서 이루어졌으며 라피네이트(raffinate) 출구 단과 탈거액(stripping solution) 출구 단 각각의 샘플을 채취하였다. 샘플 채취 시간은 초기 2시간 간격으로 채취 후 상비와 유량이 안정화 된 후부터는 6시간, 12시간 주기로 채취하였고, 수상 내의 회토류 금속의 농도는 ICP-OES를 이용하여 분석하였다.

샘플 분석 후 각 성분의 추출률(Extraction efficiency: E), 분배계수(Distribution coefficient: D) 및 분리계수(Separation factor: β)는 다음 식 (1), (2), (3)에 의해 계산하였다¹⁶⁾.

$$E(\%) = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

$$D = \frac{(C_0 - C_{eq})}{C_{eq}} \quad (2)$$

Table 2. Initial operating conditions for mixer-settler

Stage	Reagent	No. of stages	Flow rate
Extraction	0.5 M PC88A-Kerosene	4	90 mL/min Aq. 100 mL/min Org.
Scrubbing	HCl (0.1 M)	8	10 mL/min Aq. 100 mL/min Org.
Stripping	HCl (6 M)	4	100 mL/min Aq. 100 mL/min Org.
Washing	Water	3	330 mL/min Aq. 100 mL/min Org.

$$\beta = \frac{D_1}{D_2} \quad (3)$$

상기 식에서 C_0 는 초기 수상의 회토류 농도, C_{eq} 는 평형 상태의 수상 내 회토류 농도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 용매추출 회분식 실험 결과

3.1.1. 추출제 PC88A 농도의 영향

Fig. 1은 유기상에 존재하는 추출제 PC88A의 농도 증가에 따른 각 회토류금속의 추출률 변화를 나타내었다. 중회토류인 Tb, Dy의 경우 추출제 PC88A의 농도가 증가함에 따라 추출률도 함께 증가하지만 경회토류인 Pr, Nd의 경우 추출제의 농도가 낮을 때에는 추출률의 변화가 거의 없는 것으로 보인다. PC88A 농도가 0.6 M 이상에서부터 중회토류의 추출률의 변화가 줄어들고 이때 경회토류의 추출률이 증가하는 것으로 보아 유기상 내의 추출제 농도와 수상액(feed) 내의 회토류 금속의 농도가 각 회토류 금속의 추출률에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 0.6 M 이상에서 중회토류와 반응하고 남은 추출제가 경회토류와 반응하여 경회토류의 추출률이 증가하는 것으로 보인다. 추출제 PC88A 0.6 M에서 경/중회토류 추출률의 차이는 가장 크지만 추출제 농도 소모를 줄이고 0.5 M에서도 충분히 분리가 일어나는 것으로 판단되어 혼합침강조 운영을 위한 추출제 농도는 0.5 M로 설정하였다.

3.1.2. 추출제 PC88A 비누화도 증가의 영향

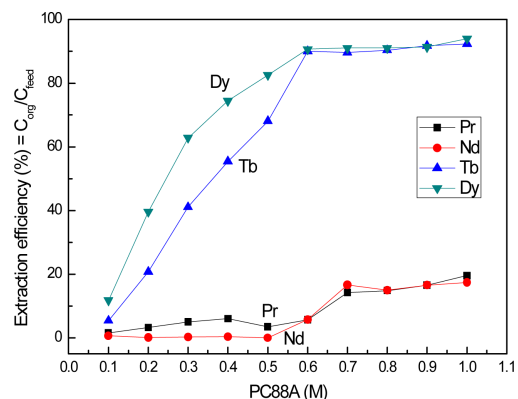
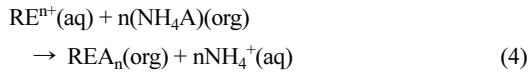


Fig. 1. Effect of PC88A concentration on the extraction of Pr, Nd, Tb, Dy in mixed solutions (A/O: 1, 25°C).

추출 반응 후 추출제에서 발생하는 H⁺ 이온은 수상으로 이동하여 수상의 pH를 낮추어 추출 구동력을 낮추는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로 추출제를 비누화시킨 다음 사용하는 방법이 사용되고 있다. 비누화 과정에서 NaOH, NH₄OH 등이 많이 사용되고 있고, 아래 식은 비누화된 추출제 사용 시 추출 반응을 나타내고 있다.



비누화 과정에서 H 이온이 NH₄이온으로 치환이 되고, 비누화된 추출제 사용 시 H⁺ 대신 NH₄⁺가 생성되기 때문에 추출 반응 후에도 수상의 H⁺ 이온이 농도에 영향을 크게 미치지 않기 때문에 추출 후 평형 pH가 크게 떨어지지 않는 장점을 가지고 있다. 본 실험에서는 희토류 금속 외에 다른 금속의 첨가를 줄이기 위하여 NH₄OH를 사용하여 PC88A를 비누화 시켜 추출제로 사용하였다. Fig. 2는 추출제 PC88A의 비누화도 증가에 따른 각 희토류 금속의 추출률과 이때 분리계수 (β, separation factor)의 변화 값을 나타내고 있다. 분리계수(β)는 경희토류 금속 중 반응성이 큰 Nd의 분배계수 D_{Nd}와 중희토류 금속 중 반응성이 작은 분배계수 D_{Tb}를 기준으로 계산하였고, 이 두 금속은 염화혼합희토류 용액 속 희토류금속 이온 중 가장 이웃한 성분이다. 분리계수 값은 Fig. 2 그래프에서 알 수 있듯이 비누화도 증가에 따른 희토류 금속 추출률의 변화 값은 크게 나타나지 않지만 분리계수 값은 크게 증가하는 것으로 보인다. 이는 추출반응 후에도 수상의 pH가 떨어지지 않아 추출반응의 구동력이 계속 작용하는 점과 더

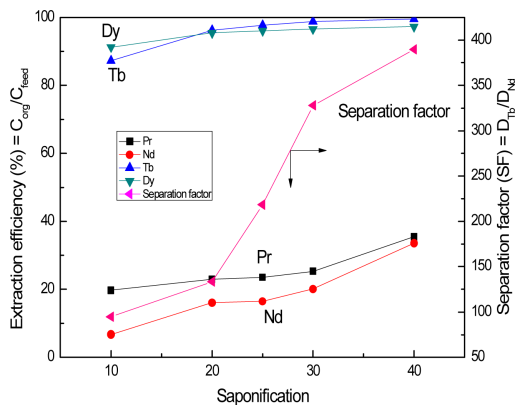


Fig. 2. Effect of saponified PC88A on the extraction of Pr, Nd, Tb, Dy in mixed solutions (A/O: 1, 25°C).

Table 3. The initial pH and equilibrium pH before and after extraction

Saponification	pH	
	initial	equilibrium
10%	1.3	0.7
20%	1.3	0.92
25%	1.3	1.03
30%	1.3	1.23
40%	1.3	1.67

불어 추출반응 후 평형 pH가 다소 증가되기 때문으로 사료된다. Table 3에 추출제 비누화도에 따른 추출 전 후 초기 pH와 평형 pH를 나타내었다.

3.1.3. 추출 평형 pH 변화의 영향

경/중희토류 분리 효과가 가장 좋은 평형 pH를 찾는 것이 중요하며, Fig. 3은 추출 반응 단계에서 추출 후 평형 pH에 따른 각 희토류 금속의 추출률의 차이를 나타내었다. 그래프에서 경/중희토류 추출률의 차이가 가장 큰 구간이 pH 1.0 근처에서 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 추출반응 후 수상의 pH를 1.0으로 맞추는 것이 경/중희토류 분리 효율을 증대시키는 데 있어 효과적인 것으로 사료된다. 본 실험에서는 추출반응 후 수상의 pH를 1.0으로 맞추기 위해서 연속식 용매추출장치인 혼합침강조에 투입되는 feed의 초기 pH를 1.3으로 설정하였다.

3.1.4. 역추출 평형 pH 변화의 영향

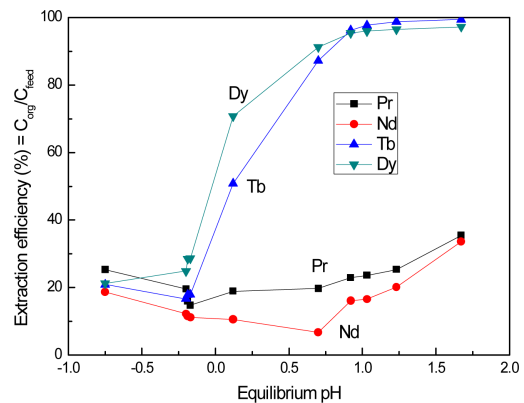


Fig. 3. Effect of equilibrium pH on the extraction of Pr, Nd, Tb, Dy in mixed solutions (A/O: 1, 25°C).

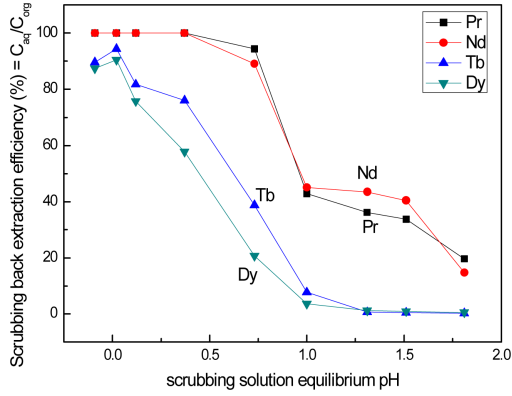


Fig. 4. Effect of scrubbing solution equilibrium pH on the back extraction of Pr, Nd, Tb, Dy in mixed solutions (A/O: 1, 25°C).

Fig. 4는 세정(scrubbing) 단계에서 세정액의 역추출(back extraction) 후 평형 pH에 따른 각 희토류 금속의 역추출률의 차이를 나타내었다. 그래프에서 보는 것처럼 pH 0.5~1.0 구간에서 경희토류와 중희토류의 역추출률 차이가 큰 것을 알 수 있다. 따라서 세정액(scrubbing solution, HCl)의 농도는 0.1 M 정도가 적당한 것으로 보인다. pH 0 이하에서 중희토류 또한 대부분 탈거(stripping)되는 것을 알 수 있으며 충분히 중희토류 금속을 탈거시키기 위해서 탈거액(stripping solution, HCl)의 농도는 2 M 정도가 적당하지만 연속식 용매추출에서 탈거액은 순환하는 구조를 가지고 있으므로 순환 과정에서 농도가 감소되는 것을 감안하여 초기 탈거액의 농도는 6 M로 설정하였다. 탈거액을 순환하는 이유는 미량의 중희토류 금속(Tb, Dy) 이온의 농도를 농축시키기 위함이다.

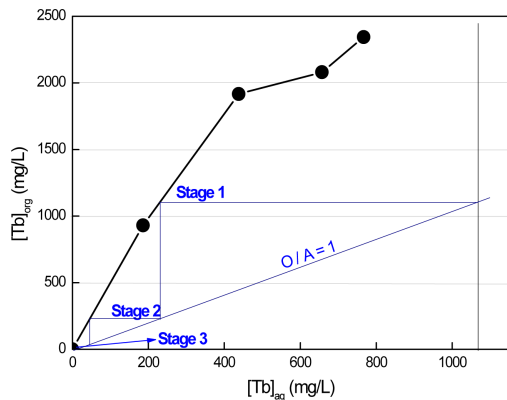


Fig. 5. Extraction isothermal curve on the Tb.

3.1.5. 적정 추출단수 설정

혼합침강조(mixer-settler) 운용에 필요한 추출 단수를 구하기 위해 추출물질 Tb의 추출 등은 곡선을 이용하였다. Fig. 5는 추출제 PC88A에 의한 Tb의 추출 등은 곡선을 나타낸 것이며, O/A 비가 1일 때 추출단 3단이 필요한 것을 알 수 있다. 혼합침강조 운용 시 추출단은 3단이면 99% 이상 Tb를 추출할 수 있지만, 추출단 3단은 회분식 실험에 의한 추정치 값이므로 공정안정성을 고려하여 추출단은 4단으로 설정하였다.

3.2. 혼합침강조(mixer-settler) 운용 결과

회분식 실험 단계에서 혼합침강조 가동을 위한 최적 운용 조건들을 찾을 수 있었다. Fig. 6은 경희토류가 분리되어 나오는 라피네이트 출구단의 운용 시간대별 희토류 금속 농도 변화를 나타내었고, Fig. 7은 중희토

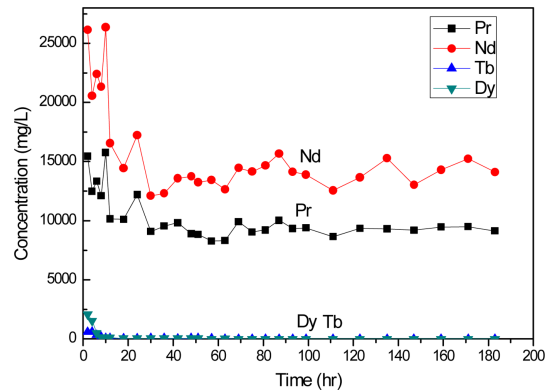


Fig. 6. Changes in each rare earth elements concentration at the raffinate outlet.

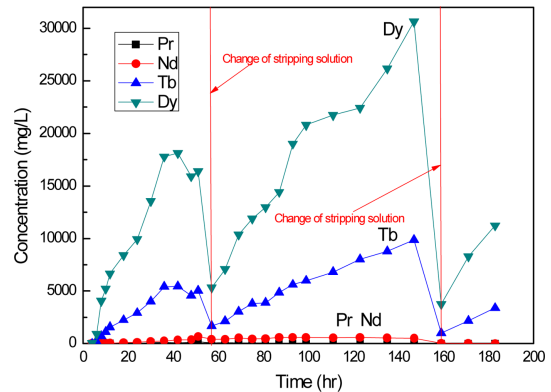


Fig. 7. Changes in each rare earth elements concentration at the stripping outlet.

류가 분리되어 나오는 탈거(striping)단의 운용시간대별 희토류 금속 농도 변화를 나타내었다. Fig. 6에서 보여 지듯이 경희토류 금속의 농도는 위아래로 변하는 그래프를 보여주고 있고, 이는 추출제 PC88A에 의한 추출 반응과 역추출 반응이 동시에 일어나고 있기 때문으로 사료된다. 초기 농도에 비해 시간이 경과 후 경희토류 금속의 농도가 낮아지는 것은 세정(scrubbing)단에서 넘어오는 세정액에 의해 feed의 농도가 희석되기 때문이다. Fig. 7에서 중희토류 금속의 농도는 희류 추출을 통하여 운용 시간이 경과할수록 농축되는 것을 알 수 있고, 운용 시간 60시간과 160시간 근처에서 농도가 급격히 감소한 것은 희류추출 중이던 탈거액(striping solution, HCl 6 M)을 중희토류의 순도 향상을 위하여 새로운 탈거액(HCl 6 M)으로 교환하였기 때문이다.

Fig. 8은 운용시간대별 경/중희토류의 순도를 나타내었다. 경희토류금속의 순도는 라피네이트 출구단에서의 희토류 금속의 농도를 통하여 구하였고, 중희토류 금속의 순도는 탈거단에서의 희토류 금속의 농도를 통하여 구하였다. 이번 혼합침강조 운용에서는 경희토류 금속의 순도를 높이기 위하여 운용 60시간에서 feed 액의 유량을 90 mL/min에서 75 mL/min으로 낮추었고, 이후 운용 70시간부터 목표했던 순도 99.9% 이상의 경희토류 금속을 라피네이트 출구단에서 얻을 수 있었다. 중희토류 금속의 순도를 높이기 위하여 운용 60시간에서 세정액의 유량을 10 mL/min에서 25 mL/min으로 높이고, 세정액의 농도 또한 0.1 M에서 0.2 M로 증가시켰다. 탈거액 또한 새로운 탈거액으로 교체하였다. 이후 운용 100시간에서 세정액의 농도를 0.2 M에서 0.25 M로 증가시켰고, 운용 160시간에서 탈거액을 새로운 탈거액으

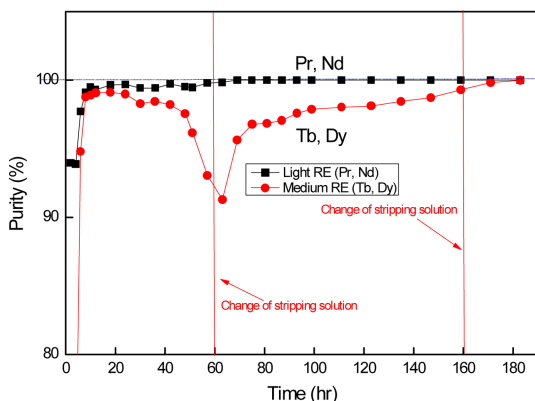


Fig. 8. Changes in purity of light/medium rare earth elements according to operation time.

Table 4. Composition of chlorides solution after final separation of light (Pr, Nd)/medium rare earth elements (Tb, Dy)

	Pr	Nd	Tb	Dy
Raffinate (mg/L)	9,150	14,110	N.D.	N.D.
Stripping (mg/L)	N.D.	2.9	3,387	11,242

로 교체하여 운용 180시간에서 목표했던 순도 99.9% 이상의 중희토류 금속을 탈거단에서 얻을 수 있었다. Table 4에 180시간 운용 후 라피네이트와 탈거단에서 회수 한 염화희토류용액의 ICP 분석 값을 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 폐 영구자석으로부터 회수한 염화희토류용액으로부터 PC88A를 사용하여 경희토류(Pr, Nd)와 중희토류(Tb, Dy)를 분리하는 용매추출 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경/중희토류 혼합 용액에서 추출제 농도가 증가함에 따라 중희토류금속의 추출률이 증가하고 추출제 PC88A 농도 0.5~0.6 M 일 때 경/중희토류 분리효율이 좋음을 확인하여 연속식 용매추출을 위한 추출제 PC88A의 농도는 0.5 M을 설정하였다.
2. 추출제 PC88A의 비누화도가 증가할수록 희토류 금속 추출률 변화 값에는 큰 영향을 미치지 않았지만 분리계수는 크게 증가함을 알 수 있었다.
3. 추출 후 평형 pH 변화에 따른 추출률의 영향에서 평형 pH가 0.8~1.0일 때 경/중희토류 분리효율이 좋음을 확인하여 feed액의 초기 pH는 1.3을 설정하였고, 역추출 후 평형 pH 변화에 따른 역추출률의 영향을 통하여 역추출 후 평형 pH가 0.5~1.0일 때 경희토류의 세정효율이 좋음을 확인하여 세정액의 농도는 0.1 M을 설정하였으며, 탈거액의 농도는 2 M이면 충분하지만 연속식 용매추출에서 탈거액은 순환하는 구조를 가지므로 초기 농도 6 M을 설정하였다.
4. 추출제 PC88A에 의한 추출물질 Tb의 추출 등은 곡선을 이용하여 O/A 비가 1일 때 추출단수 3단이면 99% 이상 Tb를 추출할 수 있지만 공정안정성을 고려하여 추출단수 4단을 설정하였다.
5. 회분식 실험에서 얻은 결과 값을 이용하여 연속식 용매추출 장치인 혼합침강조(mixer-settler)를 운용하여

180시간 경과 후 99.9% 이상의 경희토류(Pr, Nd)금속과 중희토류(Tb, Dy)금속 이온으로 분리하여 회수할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 유용자원재활용기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호: 2016002220005).

References

- Gwang-Seop Lee, Jin-Young Lee, Sung-Don Kim, Joon-Soo Kim, and Man-Seung Lee, 2004 : Solvent Extraction of Nd from Chloride Solution with PC88A, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 13(4), pp.39-45.
- Joo-Ho Park, Ho-seok Jeon, and Man-Seung Lee, 2013 : "Solvent Extraction Separation of Nd and Pr from Chloride Solution using PC88A and D2EHPA", J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 22, No. 5, pp.35-42.
- N. V. Thakur et al., 1993 : Separation of neodymium from lighter rare earths using alkyl phosphonic acid, PC88A, Hydrometallurgy, 34, pp.99-108.
- Gupta, C. K. and Krishnamurthy, N., 2005 : Extractive metallurgy of rare earths, CRC press, NY.
- Raju Banda, Hoseok Jeon, and Manseung Lee, 2012 : Solvent extraction separation of La from chloride solution containing Pr and Nd with Cyanex272, Hydrometallurgy, 121-124, pp.74-80.
- Abdeltawab, A. A., et al., 2002 : "Separation of La and Ce with PC-88A by counter-current mixer-settler extraction column", Separation and Purification Technology, 26(2), pp.265-272.
- Wang, D. J., et al., 1996 : Mechanism of the extractant loss in lanthanide extraction process with saponified organophosphorus acid extraction systems- II: Formation of aqueous aggregates, Solvent extraction and ion exchange, 14(4), pp.585-601.
- Man-Seung Lee, Gwang-Seop Lee, Jin-Young Lee, Sung-Don Kim, and Joon-Soo Kim, 2005 : "Solvent Extraction Separation of Nd and Sm from Chloride Solution with PC88A and Saponified PC88A", J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol. 14, No. 2, pp.33-42.
- Yeon-Chul Cho, Joo-Eun Lee, Hong-Il So, Jae-Woo Ahn, Hong-In Kim, and Jin-Young Lee, 2017 : Extraction & Separation Behavior of Light Rare Earth Elements from the Mixed Solutions by Cyanex 572, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(4), pp.79-87.
- Devi, N. B., Nathsarma, K. C., and Chakravorty, V., 1998 : Separation and recovery of cobalt(II) and nickel(II) from sulphate solutions using sodium salts of D2EHPA, PC88A and Cyanex 272, Hydrometallurgy, 49(1), pp.47-61.
- Sarangi, K., Reddy, B. R., and Das, R. P., 1999 : Extraction studies of cobalt (II) and nickel (II) from chloride solutions using Na-Cyanex 272.: Separation of Co(II)/Ni(II) by the sodium salts of D2EHPA, PC88A and Cyanex 272 and their mixtures, Hydrometallurgy, 52(3), pp.253-265.
- Devi, N. B., Nathsarma, K. C., and Chakravorty, V., 2000 : Separation of divalent manganese and cobalt ions from sulphate solutions using sodium salts of D2EHPA, PC 88A and Cyanex 272, Hydrometallurgy, 54(2), pp.117-131.
- Joo-Ho Park, Ho-seok Jeon, and Man-Seung Lee, 2014 : Solvent Extraction for the Separation of Nd and Pr from Chloride Leaching solution of Monazite Sand, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 23(1), pp.17-24.
- Man-Seung Lee, Jin-Young Lee, and Joon-Soo Kim, 2008 : Solvent Extraction for the Separation of Gd and Nd from Chloride Solution with PC88A and Saponified PC88A, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 17(1), pp.12-19.
- Banda, R., Jeon, H. S., and Lee, M. S., 2015 : Separation of Nd from mixed chloride solutions with Pr by extraction with saponified PC88A and scrubbing, J. of J. Ind. Eng. Chem., 21, pp.436-442.
- Nak-Kyoon Ahn, Byoungyong Im, Jieun Lee, Jae Ryang Park, Chan-Gi Lee, and Kyung-Soo Park, 2017 : Solvent Extraction of Heavy Rare Earth Elements Using PC88A from Synthesis Solution of Low Concentration Rare Earth Solution, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, 26(4), pp.26-33.

전 수 병

- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 석사과정
- 현재 성림희토금속(주) 선임연구원

손 인 준

- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 조교수
- 당 학회지 제27권 1호 참조

임 병 철

- 경북대학교 금속공학과 석사
- 현재 성림희토금속(주) 대표이사

김 정 모

- 경북대학교 화학공학과 석사
- 현재 성림희토금속(주) 선임연구원

김 연 진

- 과학기술연합대학원대학교 양자에너지 화학공학 석사
- 현재 성림희토금속(주) 연구원

하 태 규

- 금오공과대학교 신소재공학부 학사
- 현재 성림희토금속(주) 연구원

윤 호 성

- 현재 한국지질자원연구원 책임연구원
- 당 학회지 제11권 2호 참조

김 철 주

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 책임연구원
- 당 학회지 제11권 2호 참조

정 경 우

- 현재 한국지질자원연구원 광물자원 연구본부 책임연구원